

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11 N° de publication :

2 799 458

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

21 N° d'enregistrement national :

99 12661

51 Int Cl<sup>7</sup> : C 04 B 28/00, E 21 B 33/138, 33/14 // (C 04 B 28/00,  
16:04, 14:30) C 04 B 111:50

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 07.10.99.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 13.04.01 Bulletin 01/15.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : Se reporter à la fin du  
présent fascicule

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

71 Demandeur(s) : COMPAGNIE DES SERVICES  
DOWELL SCHLUMBERGER SA Société anonyme —  
FR.

72 Inventeur(s) : LE ROY DELAGE SYLVAINÉ et  
THIERCELIN MARC.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : ETUDES ET PRODUCTIONS  
SCHLUMBERGER.

54 COMPOSITIONS DE CIMENTATION ET APPLICATION DE CES COMPOSITIONS POUR LA CIMENTATION DES  
PUITS PETROLIERS OU ANALOGUES.

57 La présente invention a pour objet des compositions  
de cimentation pour puits pétrolier ou analogues comportant  
un liant hydraulique, des particules denses ayant une mas-  
se volumique supérieure à la masse volumique du liant hy-  
draulique et des particules de renforcement ayant une  
masse volumique inférieure à 1, 5 g/cm<sup>3</sup>, de préférence in-  
férieure à 1, 2 g./cm<sup>3</sup> constituée par un caoutchouc ou un  
matériau flexible, peu compressible et dont la granulométrie  
moyenne est inférieure à 600 µm.

Les compositions selon l'invention sont plus particuliè-  
rement avantageuses pour la cimentation de zones soumises  
à des contraintes extrêmes comme les zones de perforation  
et les jonctions des branches d'un puits multilatéral. Elles  
sont également très bien adaptées à la constitution de bou-  
chons.

FR 2 799 458 - A1



## **Compositions de cimentation et application de ces compositions pour la cimentation des puits pétroliers ou analogues**

La présente invention est relative aux techniques de forage de puits pétroliers, à gaz, à eau, géothermiques ou analogues. Plus précisément, l'invention concerne des compositions de cimentation tout particulièrement adaptées à la cimentation de zones soumises à des contraintes statiques ou dynamiques extrêmes.

De façon générale, un puits dont la profondeur dépasse quelques centaines de mètres est cuvelé et l'annulaire entre la formation souterraine et le cuvelage ou casing est cimenté sur tout ou partie de sa hauteur. La cimentation a pour fonction essentielle de supprimer les échanges de fluides entre les différentes couches de formation traversées par le forage et de contrôler les entrées de fluide dans le puits, notamment en limitant les entrées d'eau. Au niveau des zones productrices, le cuvelage - ainsi que le ciment et la formation sont perforés sur une profondeur de plusieurs centimètres.

Le ciment placé dans l'annulaire d'un puits de pétrole est soumis à de nombreuses contraintes tout au long de la vie du puits. La pression à l'intérieur du cuvelage peut augmenter ou décroître parce que le fluide qui le remplit change ou parce qu'une pression supplémentaire est appliquée dans le puits, comme lors du remplacement du fluide de forage par un fluide de complétion ou d'une opération de stimulation. Une modification de température crée aussi une contrainte sur le ciment au moins dans la période transitoire qui précède l'équilibre des températures entre acier et ciment. Dans la plupart des cas ci-dessus le processus de contrainte est suffisamment lent pour être traité en processus statique ; et dans certains cas, les efforts peuvent être suffisamment importants pour endommager la gaine de ciment. Il existe aussi d'autres mises sous contraintes du ciment qui sont de type dynamiques soit parce qu'elles se produisent pendant un temps très court ou parce qu'elles sont soit périodiques, soit répétitives. Les perforations introduisent une suppression de plusieurs centaines de bars à l'intérieur du puits qui se dissipe sous forme d'une onde de choc. De plus, les perforations créent un choc là où le projectile pénètre le ciment et ce choc soumet la zone entourant le trou, sur plusieurs mètres de long, à des efforts importants.

Un autre processus, maintenant très commun dans les opérations pétrolières, créateur de contraintes dynamiques pour le ciment, est l'ouverture d'une fenêtre dans un cuvelage déjà cimenté pour la création d'un puits multilatéral. Le fraisage de l'acier sur une hauteur de

quelques mètres suivis du forage du trou latéral soumet le ciment à des chocs et à des vibrations qui l'endommagent le plus souvent de façon irrémédiables.

La présente invention a pour but de nouvelles formulations notamment dans la cimentation des régions de puits pétroliers ou analogues soumises à des contraintes statiques ou dynamiques 5 extrêmes.

Dans un article présenté à la conférence technique annuelle et exposition 1997 de la SPE (Society of Petroleum Engineers), Marc Thiercelin et al. (SPE 38598, 5-8 Octobre 1997) - et la demande de brevet FR 97 11821 du 23 septembre 1997, ont montré que le risque de rupture d'une gaine de ciment dépend notamment des propriétés thermoélastiques du cuvelage, du 10 ciment et de la formation qui entoure le puits. Une analyse détaillée des mécanismes conduisant à la rupture de la gaine de ciment a mis en évidence que le risque de rupture d'une gaine de ciment par suite d'une augmentation de la pression et ou de la température dans le puits est directement lié à la valeur de la résistance à la traction du ciment et est atténué lorsque le rapport 15 entre la valeur de la résistance à la traction  $R_T$  du ciment et la valeur de son module de Young  $E$  est augmentée.

On sait que le module de Young caractérise la flexibilité d'un matériau. Pour augmenter ce rapport  $R_T / E$ , on a avantage à sélectionner des matériaux dont le module de Young est petit, autrement dit des matériaux très flexibles.

Un moyen connu pour augmenter la flexibilité d'un ciment durci est de diminuer la masse 20 volumique du coulis en l'étendant avec de l'eau. Toutefois, ceci conduit à une dégradation de la stabilité du coulis avec notamment un phénomène de séparation des phases liquides et solides. Ces phénomènes peuvent être certes contrôlés en partie par l'ajout de matériaux comme par exemple un silicate de sodium, mais le ciment durci présente néanmoins une perméabilité très grande qui ne lui permet pas de remplir sa fonction première d'isolation des zones pour 25 empêcher les migrations de fluides, ou du moins, de garantir la pérennité de cette isolation. Par ailleurs, les ciments allégés ont une moindre résistance mécanique, notamment une moindre résistance aux chocs ce qui constitue à l'évidence un handicap pour des ciments destinés à des zones soumises à des contraintes mécaniques extrêmes comme notamment les zones de perforation.

Dans le domaine du bâtiment, il est connu que l'inclusion de particules de caoutchouc dans le béton procure une meilleure résilience, durabilité et élasticité [voir par exemple A. B. Sinouci, Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate, Journal of Materials in Civil Engineering, 5, 4, 478-497 (1993)]. Les bétons incluant dans leur formulation des particules de caoutchouc trouvent des applications par exemple dans les constructions d'autoroute pour absorber les chocs, dans les murs antibruit comme isolant sonique mais également dans la construction des immeubles pour absorber les ondes sismiques lors des tremblements de terre. Pour ces applications, on cherche donc essentiellement à améliorer les propriétés mécaniques.

Dans le domaine des ciments pétroliers, il est également connu [Well cementing 1990, E. B 10 Nelson, Schlumberger Educational Services] que l'ajout de particules de caoutchouc broyé (dans une granulométrie dans la gamme 4-20 mesh) permet d'améliorer la résistance à l'impact et la résistance à la flexion. Cette amélioration des propriétés mécaniques est également signalée dans les publications de brevets SU-1384724 et SU-1323699. Plus récemment, il a été proposé dans 15 US-A-5,779,787 d'utiliser des particules dérivées du recyclage des pneus automobiles, dans une granulométrie choisie dans la gamme 10/20 ou 20/30 mesh, pour améliorer les propriétés mécaniques des ciments durcis, notamment leur élasticité et leur ductilité.

Dans sa demande de brevet français 98 16104 datée du 21 décembre 1998, la demanderesse a décrit des ciments pétroliers allégés renforcés par des particules flexibles, peu compressibles, de faible masse volumique et dont la taille moyenne n'excède pas 500 $\mu$ m. Les particules flexibles 20 ont une masse volumique inférieure à 1,5 g/cm<sup>3</sup>, de préférence inférieure à 1,2 g/cm<sup>3</sup> et de préférence encore inférieure à 1g/cm<sup>3</sup>. Il en résulte des coulis de ciments allégés. Tous les exemples donnés dans la demande de brevet français 98 16104 correspondent ainsi à des coulis dont la masse volumique est inférieure à 1,68 g/cm<sup>3</sup>.

Par ailleurs, dans la demande de brevet 98 12538, la demanderesse a également décrite des 25 coulis de ciment d'une densité inférieure à 1,70 g/cm<sup>3</sup> comportant entre 30 et 100% (rapporté au poids de ciment) de particules de caoutchouc, dans la gamme de granulométrie 40-60 mesh, avec un diamètre de préférence compris entre 250 et 400  $\mu$ m.

Comme indiqué plus haut, une diminution de la masse volumique du coulis de cimentation tend 30 à favoriser sa flexibilité et est donc le plus souvent recherchée. Pour autant, une faible masse volumique peut ne pas être souhaitée notamment en raison d'une forte pression due à la formation ou de la nature des autres fluides pompés en aval ou en amont du coulis allégé.

Les auteurs de la présente invention se sont donnés pour but des coulis de cimentation renforcés par des particules flexibles ou de caoutchouc d'une faible masse volumique mais présentant eux-mêmes des masses volumiques dans les normes ordinaires d'un coulis de cimentation pour puits pétrolier ou analogue, soit typiquement entre 1,7 g/cm<sup>3</sup> et 2,2 g/cm<sup>3</sup>.

5 Ce problème est résolu selon l'invention par des compositions de cimentation pour puits pétrolier ou analogues comportant un liant hydraulique, des particules denses ayant une masse volumique supérieure à la masse volumique du liant hydraulique et des particules de renforcement ont une masse volumique inférieure à 1,5 g/cm<sup>3</sup>, de préférence inférieure à 1,2 g/cm<sup>3</sup> constituée par un caoutchouc ou un matériau flexible, peu compressible et dont la 10 granulométrie moyenne est inférieure à 600µ.

Les particules flexibles sont constituées par un matériau dont le module de Young est inférieur à 5000 MPa (de préférence inférieur à 3000 MPa, de préférence encore inférieur à 2000 MPa), soit une élasticité pour ces particules flexibles au minimum 4 fois supérieure à celle du ciment et plus de 13 fois celle de la silice couramment employée comme additif aux ciments pétroliers. 15 Les particules flexibles ajoutées aux compositions de cimentations selon l'invention sont également remarquables par leur faible compressibilité. Les matériaux plus compressibles que le caoutchouc, ayant notamment un coefficient de Poisson inférieur à 0,45, de préférence encore inférieur à 0,4 sont préférés. Pour autant, les matériaux trop compressibles dont le coefficient de Poisson est inférieur à 0,3 ne sont pas préférés.

20 Comme particules denses, on choisira de préférence des particules d'une masse volumique bien supérieure à 3, comme par exemples des particules d'hématite dont la masse volumique est de 4,95 g/cm<sup>3</sup>.

Les particules denses et les particules de renforcement doivent être insolubles dans un milieu aqueux éventuellement salin et capables de résister en milieu basique chaud sachant qu'un coulis 25 de cimentation est généralement à un pH voisin de 13 et que la température dans un puits est couramment supérieure à 100°C.

S'agissant de la taille des particules flexibles ou de caoutchouc, on choisira de préférence des particules essentiellement isotropiques. Dans certains cas, il est possible de synthétiser directement des particules sphériques ou quasi sphériques mais le plus souvent, les particules 30 seront obtenues par broyage, notamment cryo-broyage. La taille moyenne des particules est

généralement comprise entre 80 $\mu$ m et 600 $\mu$ m, de préférence entre 100 et 500 $\mu$ m. Les particules trop fines, ou au contraire trop grosses, sont difficiles à incorporer au mélange ou conduisent à des coulis pâteux impropre à une utilisation dans un puits pétrolier.

5 Parmi les matériaux qui satisfont aux différents critères énumérés plus haut, citons notamment des thermoplastiques (polyamide, polypropylène, polyéthylène,...) ou autres polymères tels que du styrène divinylbenzène ou des styrène butadiène (SBR).

Outre les particules flexibles et les particules denses, les compositions de cimentation selon l'invention comportent un liant hydraulique, en général à base de ciment Portland et de l'eau. En fonction des spécifications propres aux conditions d'utilisation, les compositions de cimentation 10 peuvent être également optimisées par l'ajout d'additifs communs à la plupart des composition de cimentation tels que par exemple des agents de suspension, dispersants, des agents antimousse, des agents d'expansion (par exemple de l'oxyde de magnésium ou un mélange d'oxyde de magnésium et de calcium), des particules fines, des agents de contrôle du filtrat, des agents de contrôle de la migration des gaz, des agents retardateurs ou accélérateurs de prise..

15 Une composition typique selon l'invention va comporter, en volume, 2 à 15% de particules denses, 5 à 20% de particules flexibles, 20 à 45% de ciment et 40 à 50% d'eau de mélange.

Les formulations selon l'invention sont par exemple à base de ciments Portland conformes aux classes A, B, C, G et H telles que définies par la section 10 des standards de l'American Petroleum Institute (API). Sont plus particulièrement préférés les ciments Portland de classe G et 20 H mais d'autres ciments connus de cet art pourront également être utilisés avec profit. Citons notamment pour les applications à basse température des ciments alumineux et des mélanges Portland/plâtre (puits en eau profonde par exemple) ou des mélanges ciment/silice (pour les puits dont la température excède 120 °C par exemple), ou encore les ciments obtenus par mélange d'un ciment Portland, de ciments de laitiers et/ou de cendres volantes.

25 L'eau utilisée pour constituer le coulis est de préférence une eau peu minéralisée comme de l'eau du robinet. D'autres eaux, comme par exemple de l'eau de mer, peuvent éventuellement être utilisées mais ceci n'est généralement pas préféré.

Ces particules de faible masse volumique par rapport au ciment apportent une flexibilité au système, puisque l'ajout de particules flexibles donnent des ciment avec un module de Young

plus faible, tout en permettant d'obtenir une perméabilité faible et une meilleure résistance aux impacts.

Les compositions comportant des particules flexibles selon l'invention ont des propriétés mécaniques remarquables qui les rendent tout particulièrement adaptées à des cimentations dans 5 des régions de puits pétrolier soumises à des contraintes extrêmes, comme les zones de perforations, les jonctions de branches d'un puits latéral ou la formation de bouchons.

La présente invention est illustrée par les exemples qui suivent.

#### **Formulations de coulis de ciment**

10 On a préparé des coulis à base d'un ciment (dit ciment HMR) résistant aux sels magnésiens à base de ciment Portland, de scories de hauts fourneaux et de cendres volantes, de particules de polypropylène, de particules d'hématite, d'eau, et de différents additifs conventionnels tels qu'un dispersant, un retardateur et un anti-mousse.

15 Les formulations et les propriétés du coulis de ciment sont données dans les tableaux 1 à 3 ; la masse volumique  $\rho$  de coulis de ciment est d'environ  $1,92 \text{ g/cm}^3$  (16 ppg) pour toutes les compositions. Ceci illustre une caractéristique majeure de l'invention qui dissocie densité du coulis et concentration en particules flexibles.

20 Le polypropylène utilisé dans cet exemple est produit par la société ICO Polymer sous la dénomination ICORENE 9013 P. Sa masse volumique est de  $0,905 \text{ g/cm}^3$ . Sa spécification initiale en terme de granulométrie est telle qu'au plus 5% des particules ont une taille supérieure à  $800\mu\text{m}$ , 30% une taille supérieure à  $500\mu\text{m}$  et moins de 15% une taille inférieure à  $200\mu\text{m}$ .

Les particules d'hématites ont une dimension moyenne de  $50 \mu\text{m}$ .

25 Dans le tableau 1 ci-après, on a indiqué la quantité d'hématite et de polypropylène ajoutée par rapport au poids de ciment HMR et en proportion volumique (par volume de mélange ciment HMR-hématite-propylène, noté bvob, abréviation de « by volume of blend »).

Le dispersant utilisé est un polynaphtalène sulfonate, le retardateur est un lignosulfonate. L'agent d'expansion est de l'oxyde de magnésium).

Pour les additifs solides (l'agent d'expansion et l'agent de contrôle de filtrat), les proportions indiquées sont par rapport au poids de ciment HMR (bwoc, abréviation de « by weight of cement », par poids de ciment. Pour les additifs se présentant sous forme liquide (l'agent antimousse, le dispersant et le retardateur), les proportions sont indiquées en gallons par sac (gps) 5 soit 3,78541 litres pour un sac de 42,637 kg de ciment HMR, autrement dit, 1gps= 0,0888 l d'additif par kg de ciment HMR.

**Tableau 1 : Formulation des coulis de ciment**

	Hématite %bwoc %bvob		Polypropylene %bwoc %bvob		Agent d'expansion	Contrôle filtrat	Anti- mousse	Dispersant	Retardateur
#1	11	5	6	15	2,34		0,038	0,33	0,11
#2	50	16,14	15,2	27	3,30		0,054	0,155	0,155
#3	100	23,54	27	35	4,54	0,45	0,075	0,213	0,213
#4	50	16,14	15,2	27	2,15	0,33	0,054	0,155	0,116

10 **Tableau 2 : Masse volumique et porosité des coulis**

Formulation	Masse volumique		Porosité
	ppg	g/cm <sup>3</sup>	
#1	16,16	1,936	46%
#2	16,17	1,938	46%
#3	16,22	1,944	46%
#4	16,11	1,930	46%

La rhéologie des coulis #1 et #4 ont été mesurées selon la procédure recommandée par API 10 (American Petroleum Institute). On mesure à la température du laboratoire, la rhéologie immédiatement après le mélange et la rhéologie après 20 minutes de conditionnement en 15 température. Les résultats sont donnés dans le Tableau 3. La rhéologie d'un coulis est caractérisée par sa viscosité plastique PV (en cP ou mPa.s), le facteur de conversation étant égal à 1) et le seuil de cisaillement ou Ty (donné en lbf/100ft<sup>2</sup>, la conversation en Pascal s'obtenant en multipliant par 0,478803), en considérant que le coulis est un fluide de Bingham.

Tableau 3 : Rhéologie et eau libre

Formulation	Rhéologie après mélange à la température du laboratoire		Rhéologie après conditionnement à 85°C	
	PV (mPa.s)	Ty (lbf/100ft <sup>2</sup> )	PV (mPa.s)	Ty (lbf/100ft <sup>2</sup> )
#1	226	9,3	86	9,4
#2	117	6,2	42,6	6,8
#3	131	8,5	68,5	9,1
#4	198	12	131	19,7

Ces mesures de rhéologie montrent que les coulis sont aptes à être pompés dans un puits de type pétrolier.

5 Pour le coulis #4, on a de plus vérifié sa stabilité en déterminant le profil de densité d'une colonne de ciment pris sous pression et en température dans des conditions statiques. Pour ce faire, le coulis est versé après préparation dans un moule cylindrique de 20,32 cm de hauteur et 2,54 cm de diamètre. Le coulis est mélangé et agité pendant 20 minutes à 85°C et versé dans le moule préchauffé à la même température. La température est augmentée à 2°C par minute 10 jusqu'à la température de test (120 °C). Une pression de 20,68 MPa est appliquée et maintenue pendant tout le test (24 heures). A la fin du test, on mesure la densité en haut et en bas du tube. Pour le coulis #4, on a trouvé un écart de 0,013 g/cm<sup>3</sup> entre le haut et le bas ce qui indique que le coulis est stable bien qu'il comporte une quantité importante d'hématite.

Le développement de la résistance à la compression au cours du durcissement du ciment est 15 évalué par mesures ultrasons « UCA » (Ultrasonic Cement Analyser). Ces mesures permettent de déterminer le temps de prise nécessaire pour l'obtention d'une résistance donnée (0,34 MPa-50 psi et 3,4 MPa=500 psi) et la résistance à la compression Rt obtenue après un temps donné (24 et 48 heures), sous une pression de 3000 psi (20,7 MPa).

Tableau 4 : UCA et temps de prise à T= 120°C

N	Temps d'épaississement à 95°C	Temps pour obtenir 0,34 MPa à T (h :mn)	Temps pour obtenir 3,4 MPa à T (min)	Résistance à la compression après 24 heures (MPa)	Résistance à la compression après 48 heures (MPa)
#4	5 :17	7 :12	7 :30	15	17,8

### Propriétés mécaniques de compression

Les propriétés mécaniques de compression sont mesurées sur certains des coulis préparés.

L'influence de l'addition des particules d'hématite et des particules flexibles sur les propriétés mécaniques du ciment pris est étudiée sur des systèmes placés plusieurs jours en pression et en 5 température dans des chambres haute pression et haute température pour simuler les conditions rencontrées dans un puits de pétrole.

Les essais sont réalisés sur des cubes de 5 cm d'arêtes (2 inch) obtenus après 3 jours à 120 °C et à 20,7 MPa (3000 psi).

A titre de comparaison, on a également formulé un système NET sans particules flexibles ni 10 hématite, ayant une masse volumique de 1,941 g/cm<sup>3</sup> (16,2 ppg), une porosité de 48%, simplement préparé avec du ciment de type HMR, un agent anti-mousse (0,04 gpc) et un dispersant (0,02 gpc). On a de plus repris les résultats obtenus avec la formulation C1 décrite dans la demande de brevet français 98 16104, constituée d'un mélange de ciment classe G, de 19,4% (par poids de ciment) de particules de polypropylène, de 0,022 gpc d'un dispersant, 0,045 15 gpc d'un agent retardateur et de 0,030 gpc d'un agent anti-mousse. La porosité de cette formulation est de 45%, sa masse volumique de 1,67 g/cm<sup>3</sup>. Les tests de résistance en flexion et en compression sur cette formulation ont été réalisés après 5 jours.

Les résultats sont présentés au tableau 5 où Mr Cs désigne la résistance à la compression et Ec le module de Young en compression.

20 Tableau 5 : Résultats de compression avec des particules flexibles

Formulation	CS (MPa)	Ec (MPa)	CS/Ec (x 1000)	Energie (J)
NET	39,2	9041,6	4,33	10,77
C1	21,6	3977,2	5,49	14,28
#1	35,5	6242,6	5,81	19,00
#2	21,1	2594,1	8,17	19,25
#3	13,4	1177,29	11,38	15,94

On constate que les compositions selon l'invention ont un module de Young en compression qui décroît fortement avec de plus grandes quantités de particules de polypropylène ajoutées. La comparaison des formulations C1 et #2, qui comportent des quantités analogues de particules de

polypropylène rapportées au poids de ciment montrent de plus que loin de s'opposer à cette décroissance du module de Young, l'addition de particules d'hématite y contribue.

#### **Mesure du coefficient de Poisson**

5 Des mesures de coefficient de Poisson sont réalisées sur différentes formulations avec des particules flexibles pour évaluer la compressibilité de ces systèmes. La composition des différentes formulations est donnée dans les exemples précédents.

Lorsqu'un échantillon de ciment est soumis à un effort normal de compression, tout en restant dans le domaine élastique du matériau, les fibres longitudinales de l'échantillon subissent un

10 raccourcissement qui dépend du module de Young du matériau (ainsi que de la contrainte appliquée et de la géométrie de l'échantillon). Simultanément, la dimension transversale de l'échantillon subit un allongement. Le rapport de la déformation transversale (variation relative de la dimension transversale) par la déformation longitudinale (variation relative longitudinale) est un coefficient sans dimension, appelé coefficient de Poisson.

15 Dans nos essais, la vitesse de mise en charge est de 1 kN / min, les échantillons sont cylindriques, avec un diamètre de 30 mm et une hauteur de 60 mm. La mesure de déformation longitudinale est effectuée à l'aide de capteurs de déplacement de type LVDT, la mesure de déformation transversale est effectuée par un capteur à jauge d'extensométrie.

20 Les échantillons sont placés dans une enceinte remplie d'eau pendant 3 jours à 120 °C et sous 3000 psi. Ce sont les mêmes conditions de vieillissement que celles utilisées pour préparer les échantillons pour les mesures de compression. Après la cure, les échantillons sont maintenus immersés en permanence et sont simplement égouttés avant d'effectuer les essais mécaniques qui sont donc réalisées sur des échantillons humides.

25 Pour la formulation #4, on a mesuré une valeur du coefficient de Poisson du ciment durci égale à 0,239 pour une masse volumique de 1,93 g/cm<sup>3</sup>. Pour des ciments conventionnels de même masse volumique, le coefficient de Poisson oscille entre 0,15 et 0,2. Ceci indique que les ciments selon l'invention présentent une moindre compressibilité. De ce fait, le ciment durci va mieux répartir les efforts latéraux ou mieux distribuer les efforts en réponse à une contrainte de compression ce qui est très favorable à une bonne isolation de zone.

### **Mesure de l'expansion**

L'expansion linéaire des coulis de ciment lors de leur prise en température simulant les conditions du puits est mesurée dans un moule annulaire d'expansion. Ce moule est constitué par deux anneaux concentriques, ayant respectivement un diamètre de 51 mm et 89 mm, placés

5 entre deux disques plats distants de 22 mm. L'anneau extérieur est fendu dans le sens de la hauteur et comporte deux repères situés de part et d'autre de la fente qui permettent de mesurer la distance lors de l'expansion du ciment. Le coulis de ciment à étudier est versé dans le moule, le moule est ensuite placé dans un bain à eau thermostaté à 95 °C. Le laitier reste en contact avec l'eau pendant tout le test.

10 Les résultats d'expansion sont présentés dans le Tableau 6.

**Tableau 6 : Résultats d'expansion**

	Expansion linéaire % après 4 jours	Expansion linéaire % après 6 jours	Expansion linéaire % après 11 jours
NET	0	0	0
#4	0,29	0,29	0,36

Le comportement d'expansion est tout particulièrement intéressant pour la prévention d'un décollement entre le tubage et le ciment, et entre le ciment et la formation. Ce comportement est d'autant plus intéressant que le ciment est flexible et donc se trouvera confiné par la roche.

15 Les coulis selon l'invention s'avèrent donc bien adaptés à la cimentation de zones soumises à des contraintes statiques ou dynamiques extrêmes comme les zones de perforation, les jonctions des branches d'un puits multilatéral ou les zones à sel nécessitant des changements de pression de boue importants.

### Revendications

1. Composition de cimentation pour puits pétrolier ou analogues comportant un liant hydraulique, des particules denses ayant une masse volumique supérieure à la masse volumique du liant hydraulique et des particules de renforcement ont une masse volumique inférieure à  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , de préférence inférieure à  $1,2 \text{ g/cm}^3$  constituée par un caoutchouc ou un matériau flexible, peu compressible et dont la granulométrie moyenne est inférieure à  $600\mu\text{m}$ .
2. Composition de cimentation selon la revendication 1, caractérisé en ce les particules denses sont des particules d'hématite.
- 10 3. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le module de Young du matériau constituant les particules de renforcement est inférieur à  $5000 \text{ MPa}$ , de préférence inférieur à  $3000 \text{ MPa}$ , et de préférence encore inférieur à  $2000 \text{ MPa}$ .
4. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce 15 que le coefficient de Poisson du matériau constituant les particules de renforcement est supérieur à  $0,3$ .
5. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les particules de renforcement ont une taille moyenne comprise entre  $80\mu\text{m}$  et  $600\mu\text{m}$ , de préférence entre  $100$  et  $500\mu\text{m}$ .
- 20 6. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les particules de renforcement sont dans un matériau flexible choisi parmi le polyamide, le polypropylène, le polyéthylène, le styrène butadiène et le styrène divinylbenzène.
7. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce 25 que le coulis comporte en volume, 2 à 15% de particules denses, 5 à 20% de particules flexibles, 20 à 45% de ciment et 40 à 50% d'eau de mélange.

8. Composition de cimentation selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comporte en outre un ou plusieurs additifs du type agent de suspension, dispersants, anti-mousse, retardateurs, accélérateurs de prise du ciment, agents de contrôle du filtrat, agent de contrôle de la migration des gaz, agent d'expansion.

5 9. Application des compositions de cimentation selon l'une des revendications 1 à 6 à la cimentation de zones soumises à des contraintes dynamiques extrêmes comme les zones de perforation et les jonctions des branches d'un puits multilatéral.

10. Application des compositions de cimentation selon l'une des revendications 1 à 6 à la constitution de bouchons de ciment.